Journal of Quality Engineering and Management

www.pqprc.ir

J. Qual. Eng. Manag. Vol. 14, No. 1 (2024) 1–17.

Paper Type: Original Article

Proposing a Framework for Reliability Estimation Using a Proportional Hazards Model Based on Diesel Engine Condition Monitoring Data

Seyyed Mohammad Reza Miraei[1], Saeed Ramezani[1], Hamzeh Soltanali[1,*]

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran; mohammadrezamiraee@ihu.ac.ir; ramezani.sr@gmail.com; soltanali.hamzeh@yahoo.com.

Citation:

Received: 23 October 2023 *Revised: 03 January 2024* *Accepted: 05 February 2024*	Miraei, S. M. R., Ramezani, S., & Soltanali, H. (2024). Proposing a framework for reliability estimation using proportional hazards model based on diesel engine condition monitoring data. *Journal of Quality Engineering and Management, 14*(1), 1-17.

Abstract

Purpose: This study aims to improve diesel engine reliability estimation by using a risk-based model that incorporates key environmental factors, especially wear particles in engine oil, for more accurate analysis than traditional time-based methods.

Methodology: The Proportional Hazards Model (PHM) was used to assess engine reliability based on wear particles in oil. The Harrell and Lee test checked model assumptions, and the Wald test validated coefficients. Reliability was then compared across two engine groups under different conditions.

Findings: The study's results showed that incorporating risk factors, such as the level of wear particles in engine oil, increases the accuracy of reliability estimation for diesel engines. Specifically, it was found that engine age, maintenance status, and operational conditions significantly impact reliability, such that worn-out engines reach lower levels of reliability more quickly. The proposed model, by providing a more precise analysis, can serve as an effective tool for optimizing maintenance scheduling and preventing unexpected failures in industrial systems.

Originality/Value: This research's primary distinction lies in the integration of qualitative data related to the internal condition of the engine (wear particles in oil) with advanced statistical models of PHM, which has been less addressed in previous studies. This approach, by creating a link between condition-based data analysis and reliability analysis, opens new horizons for condition-based maintenance planning.

Keywords: Reliability, Proportional hazards model, Condition monitoring of diesel engines, Oil analysis, Weibull distribution, Operational condition assessment of diesel engines.

Corresponding Author: soltanali.hamzeh@yahoo.com

10.48313/jqem.2024.214729

Licensee System Analytics. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

مهندسی و مدیریت کیفیت

www.pqprc.ir

دوره ۱۴، شماره (۱)، (۲۰۲۴)، ۱۷-۱

نوع مقاله: پژوهشی

ارایه چارچوبی برای محاسبه قابلیت اطمینان با استفاده از مدل خطرات نسبی با محوریت داده‌های پایش وضعیت موتور دیزل

سید محمد رضا میرایی[۱]، سعید رمضانی[۱]، حمزه سلطانعلی[۱،*]

[۱]گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه امام حسین (ع)، تهران، ایران.

چکیده

هدف: این مطالعه با هدف بهبود برآورد قابلیت اطمینان موتورهای دیزل، از طریق یک مدل مبتنی بر ریسک انجام شده که عوامل محیطی کلیدی به‌ویژه ذرات فرسایشی موجود در روغن موتور را برای تحلیلی دقیق‌تر نسبت به روش‌های سنتی مبتنی بر زمان لحاظ می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش: مدل خطرات نسبی[۱] برای ارزیابی قابلیت اطمینان موتور بر اساس ذرات فرسایشی موجود در روغن به‌کار گرفته شد. آزمون *Harrell* و *Lee* برای بررسی مفروضات مدل و آزمون *Wald* برای اعتبارسنجی ضرایب استفاده شد. در نهایت، قابلیت اطمینان بین دو گروه موتور با شرایط عملیاتی متفاوت مقایسه شد.

یافته‌ها: نتایج تحقیق نشان داد که لحاظ‌کردن فاکتورهای ریسک، مانند سطح ذرات فرسایشی در روغن‌موتور، موجب افزایش دقت در برآورد قابلیت‌اطمینان موتورهای دیزل می‌شود. به‌طور خاص مشخص شد که سن، وضعیت تعمیرات و شرایط عملیاتی تاثیر معناداری بر قابلیت‌اطمینان دارند به‌گونه‌ای که موتورهای فرسوده سریع‌تر به سطح پایین‌تری از قابلیت اطمینان می‌رسند. مدل پیشنهادی با فراهم‌سازی تحلیلی دقیق‌تر، می‌تواند ابزار موثری برای بهینه‌سازی زمان‌بندی تعمیرات و پیشگیری از خرابی‌های ناگهانی در سیستم‌های صنعتی باشد.

اصالت/ارزش افزوده علمی: تمایز اصلی این تحقیق در تلفیق داده‌های کیفی مرتبط با وضعیت داخلی موتور (ذرات فرسایشی در روغن) با مدل‌های آماری پیشرفته *PHM* است که در تحقیقات پیشین کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. این رویکرد با ایجاد پیوند بین تحلیل داده‌های شرایط عملکردی و تحلیل قابلیت‌اطمینان، افق‌های جدیدی در برنامه‌ریزی نگهداری مبتنی بر وضعیت فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: قابلیت اطمینان، مدل خطرات نسبی، پایش وضعیت موتور دیزل تحلیل روغن، توزیع ویبول، ارزیابی وضعیت عملیاتی موتور دیزل.

۱- مقدمه

در بسیاری از صنایع مانند صنایع اتومبیل، هسته‌ای و هوایی، سیستم‌ها قابلیت تعمیرپذیری دارند و اغلب در معرض نیاز به تعمیر و نگهداری ناقص قرار می‌گیرند. در کشورهای پیشرفته که از نظر فنی، تکنولوژیکی یا سیاسی محدودیت چندانی در تامین ماشین‌آلات و قطعات ندارند، فناوری‌های

[1] Proportional Hazards Model (PHM)

پیشرفته نگهداری و تعمیرات به شکل گسترده‌ای در صنایع به کار گرفته می‌شوند؛ اما در بسیاری از کشورهایی که با محدودیت‌های تجهیزاتی یا ساخت مواجه‌اند، استفاده از روش‌های نو ین نگهداری و تعمیرات کم‌تر موردتوجه قرار می‌گیرد [1].

موفقیت سازمان‌ها در ارایه خدمات و بهبود کیفیت آن‌ها به عوامل متعددی بستگی دارد. در این راستا، داشتن یک سیستم نگهداری و تعمیرات مؤثر که به‌عنوان یکی از عوامل کلیدی در عملکرد هر سازمان محسوب می‌شود، ضروری است. نگهداری و تعمیرات به‌عنوان یکی از پایه‌های اصلی بهره‌وری شناخته می‌شود و می‌تواند به‌عنوان یک فرهنگ که هدف آن بهبود شرایط موجود است، معرفی گردد. این فرهنگ به کارکنان می‌آموزد که چگونه بهترین مسیر را برای دستیابی به حداکثر بازدهی انتخاب کنند. اولین و مهم‌ترین گام برای اجرای موفقیت‌آمیز نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، برنامه‌ریزی و اجرای فعالیت‌های نگهداری و تعمیرات بر اساس وضعیت تجهیزات است. از طریق روش‌های ارزیابی وضعیت، می‌توان معایب و مشکلات احتمالی و بالقوه تجهیزات را تشخیص داد [1]. ارزیابی قابلیت اطمینان چنین سیستم‌هایی به‌طورکلی با مشاهده شکست‌های آن‌ها انجام می‌شود که می‌تواند عواقب شرایط بد محیطی باشد و بنابراین مدل‌سازی ریاضی داده‌های خطا همراه با دیگر عوامل خطر ضروری می‌شود. تحقیق‌های موجود عمدتا دو نوع مدل برای مقابله با چنین شرایطی ارایه می‌دهند.

۱. مدل‌های نگهداری ناقص (کلاسیک)[1].
۲. مدل‌های خطر متناسب (مبتنی بر فاکتور ریسک)[2].

مدل‌های مورد اشاره دودسته اصلی از مدل‌ها برای مدل‌سازی قابلیت اطمینان و تحلیل داده‌های طول عمر هستند و ابزارهای مهمی در مدل‌سازی و تحلیل مسایل عملی صنعتی به شمار می‌روند. در برخی موارد، برای افزایش دقت و صحت تحلیل قابلیت اطمینان، از ترکیب دو مدل مختلف استفاده می‌شود. این مدل‌ها شامل مدل‌های نگهداری ناقص، مانند توزیع ویبول[3]، هستند که تنها مدت‌زمان وقوع خرابی را مدنظر قرار می‌دهند؛ اما برای تحلیل دقیق‌تر خرابی، ضروری است که عوامل ریسک (پارامترهای خطر) نیز در نظر گرفته شوند؛ در غیر این صورت، پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم به‌درستی انجام نمی‌شود. برای این منظور، مدل‌های خطر متناسب که اثرات عوامل ریسک، مانند شرایط محیطی و ذرات فرسایشی در روغن را به‌عنوان متغیرهای کمکی در کنار داده‌های خرابی در نظر می‌گیرند، می‌توانند به بهبود دقت پیش‌بینی عمر سیستم کمک کنند. با استفاده از این مدل‌ها، ارتباط بین عوامل ریسک و خرابی سیستم شناسایی‌شده و امکان پیش‌بینی بهتر و برنامه‌ریزی بهینه برای نگهداری سیستم فراهم می‌شود [2].

رگرسیون کاکس برخلاف مدل‌های پارامتری، نیازی به فرض توزیع مشخصی برای زمان شکست ندارد و به تحلیل بقا بر اساس داده‌های واقعی می‌پردازد. این ویژگی انعطاف‌پذیری بیشتری برای درنظرگرفتن عوامل چندگانه تاثیرگذار بر قابلیت اطمینان موتورهای دیزل، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده و چالش‌برانگیز فراهم می‌کند. نتیجه این رویکرد دقیق‌تر در پیش‌بینی قابلیت اطمینان، امکان برنامه‌ریزی بهینه‌تر برای نگهداری و تعمیرات را فراهم کرده و به کاهش هزینه‌های عملیاتی و افزایش عمر مفید تجهیزات منجر می‌شود. از جمله نوآوری این تحقیق می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. ارایه رویکردی جدید برای مقایسه قابلیت اطمینان بین دو گروه از موتورهای دیزل با شرایط نگهداری متفاوت (موتورهای با سن و کارکرد بالا در مقابل موتورهای جدید و موتورهایی که تعمیرات اساسی را به‌تازگی تجربه کرده‌اند).
۲. کاهش عدم قطعیت در محاسبه قابلیت اطمینان از طریق درنظرگرفتن داده‌های واقعی و ریسک‌های عملیاتی که در روش‌های قبلی محاسبه نمی‌شدند.

[1] Traditional imperfect maintenance
[2] Proportional Hazard Models (PHM)
[3] Weibull distribution

۲- پیشینه تحقیق

۲-۱- استفاده از مدل‌های کلاسیک

قم قلعه و همکاران [3] قابلیت اطمینان را به حوزه مهندسی معدن معرفی کرد. در دهه بعد، کومار و همکاران [4] یک فرآیند یکپارچه برای تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان بارگیری که شامل سه دستگاه *LHD* است، ارایه کردند. لو و لو ییس [5] برای محاسبه قابلیت اطمینان و متوسط زمان بین خرابی‌ها، از توزیع و ییول و گراف و ییول استفاده نمودند. دولاس و دشموک [6] در مقاله‌ای به تحلیل قابلیت اطمینان سیستم خنک‌کننده موتور دیزل با استفاده از کمپرسور پرداختند. آن‌ها از داده‌های زمان تا خرابی سیستم خنک‌کننده و روش تحلیلی حداقل مربعات با استفاده از توزیع و ییول و نرم‌افزار *Minitab 16.1R* برای تخمین پارامتر استفاده کردند [6]. بهاردواج و همکاران [7] در تحقیق خود به بررسی قابلیت اطمینان موتور لوکوموتیو دیزل با استفاده از توزیع و ییول با استفاده از نرم‌افزار *PTC Windchill-11* پرداخته است. ناجی و همکاران [8] به تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان یک موتور دیزل دریایی *FBM* مدل ۳۸ با استفاده از توزیع و ییول پرداختند. گو و همکاران [9] به بررسی قابلیت اطمینان تجهیزات کنترل ایمنی و اضطراری در معادن بر اساس تابع توزیع سه پارامتری و ییول ، همراه با ویژگی‌های عمر مفید تجهیزات سیلندر قدرت و شیر برقی پنوماتیک موجود در سیستم‌های ایمنی معدن را تجزیه‌وتحلیل می‌کنند.

مطالعات موجود در حوزه نگهداری و تعمیرات به‌طور معمول عوامل مهمی مانند شرایط محیطی، استفاده نادرست، فشار زیاد بر تجهیز، استفاده از روغن نامناسب و عدم هم‌محوری مناسب پس از تعمیر را نادیده گرفته‌اند. این عوامل می‌توانند بر میزان ذرات فرسایشی موجود در روغن‌موتور (موتور دیزل) تاثیرگذار باشند. تاکنون، تحقیقات بیشتر بر جنبه‌های زمانی (پارامتریک) خرابی تمرکز داشته‌اند. برای بررسی دقیق‌تر تاثیرات عوامل مختلف بر تجهیزات، نیاز به روش‌های تحلیلی جامع‌تری وجود دارد که شامل اندازه‌گیری وضعیت، شناسایی نقاط ضعف و ارایه راهکارهای بهینه می‌شود. این روش‌ها به بهبود نگهداری و تعمیرات کمک کرده و از خرابی‌های غیرمنتظره جلوگیری می‌کنند. روانکار در تجهیزات مانند خون در بدن عمل می‌کند؛ علاوه بر حذف آلودگی‌ها، مواد موردنیاز قطعات مانند عوامل ضدسایش، مقاوم به فشار و محافظ در برابر خوردگی را تامین می‌کند.

۲-۲- استفاده از مدل‌های مبتنی بر ریسک

مدل کاکس، توسط کاکس [10] معرفی شد. پیش‌بینی می‌شد که این مدل در حوزه‌های قابلیت اطمینان و علوم پزشکی کاربرد گسترده‌ای خواهد داشت و واقعا چنین اتفاقی رخ داد. ابتدا، این مدل توسط پژوهشگران به‌منظور پزشکی و اندازه‌گیری تاثیر شرایط مختلف بر سلامت و فرآیند بهبود بیماران استفاده شد. از این مدل در ابتدا برای مدل‌سازی فرآیند خرابی در اجرا راکتور آب سبک استفاده شد. جاردین و همکاران [11] برای تجزیه‌وتحلیل داده‌های خرابی کشتی و هواپیما، از یک مدل استفاده نمودند که برای محاسبه تابع مخاطره یک سیستم، به‌صورت یک تابعی از شاخص‌های شرایط سیستم عمل می‌کرد. تحلیل و مدل‌سازی مخاطرات در حوزه حمل‌ونقل دریایی و هوایی از اهمیت بالایی برخوردار است. بررسی و پیش‌بینی خرابی‌ها و حوادث احتمالی در این صنایع می‌تواند بهبود ایمنی و عملکرد سیستم‌ها را بهبود بخشد. در این راستا، به‌منظور ارزیابی مخاطرات و تجزیه‌وتحلیل داده‌های خرابی در صنایع حمل‌ونقل، از یک مدل محاسبه مخاطره استفاده نمودند. این مدل، تابعی است که براساس شاخص‌های شرایط سیستم، میزان مخاطره را برای سیستم مورد بررسی محاسبه می‌کند. در واقع، با ارتباط دادن وزن‌دهی مناسب به شاخص‌های مختلف، مدل قادر است تاثیر هر شاخص بر مخاطره را تعیین نماید.

این تابع مخاطره به‌صورت تحلیلی یا احتمالی محاسبه می‌شود و امکان پیش‌بینی خرابی‌ها و حوادث آتی را فراهم می‌کند. برای ارتقای دقت و صحت مدل، از داده‌های خرابی کشتی و هواپیما استفاده کردند. این داده‌ها شامل اطلاعاتی درباره شرایط و وقایع قبل از خرابی، جزییات فنی سیستم‌ها، عوامل احتمالی مخاطره‌زا و نتایج نهایی خرابی بودند. با استفاده از این داده‌ها، مدل قادر به ارزیابی مخاطرات و تحلیل میزان خطرات مربوط به شرایط خاص سیستم‌ها شد [11].

استفاده از مدل محاسبه مخاطره در این تحقیق، به محققان و متخصصان حوزه حمل‌ونقل امکان می‌دهد تا درک بهتری از ریسک‌ها و مخاطرات مرتبط با عملکرد سیستم‌ها داشته باشند. این اطلاعات می‌تواند به طراحی بهتر سیستم‌های ایمن‌تر و بهبود روش‌ها و فرآیندهای پیشگیری و مدیریت مخاطرات کمک کند [11]. کومار و کلفسجو [4] یک بررسی جامع از مدل نرخ مخاطرات متناسب را ارایه دادند که به‌طور کامل مورد مرور قرار

گرفت. هدف اصلی این مدل، درنظرگرفتن تاثیر شرایط محیطی در تحلیل قابلیت اطمینان بود. پس از معرفی اساس مدل، کومار و کلفسجو روش‌های تخمین پارامترهای رگرسیون و تعیین تابع نرخ مخاطره پایه را به‌طور جامع شرح دادند. علاوه بر این، در مطالعه خود، دو نوع آزمون ترسیمی و تحلیلی را برای ارزیابی نیکو یی برازش مدل معرفی کردند.

در دوره زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۲، قدرتی و همکاران [16–12] به‌طور نخستین، از مدل خطرات متناسب در مدیریت قطعات یدکی ماشین‌آلات معدنی بهره‌برداری نمودند. این مدل، به‌منظور تحلیل و ارزیابی خطرات مرتبط با قطعات یدکی ماشین‌آلات معدنی به‌کار می‌رود. علاوه بر این، برآبادی [13] در تحلیل قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی معدن بوکسیت، از مدل نرخ مخاطرات متناسب لایه‌بندی شده استفاده کرد. این مدل، جهت تخمین نرخ مخاطرات و ارزیابی قابلیت اطمینان ناوگان استخراجی به‌کار گرفته شد.

در این تحقیق، وانگ لو و همکاران [14] از یک نرم‌افزار مدل‌سازی خطرات متناسب به‌عنوان ابزار اصلی خود استفاده نمودند. این نرم‌افزار به‌منظور ارزیابی مزایای بالقوه یک سیاست تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط برای موتورهای دیزلی خودروهای نظامی به کار گرفته شد. در این مطالعه، محققان با استفاده از این نرم‌افزار، مدل‌های خطرات مرتبط با شرایط مختلف موتورهای دیزلی را بررسی کردند و مزایای احتمالی اجرای سیاست تعمیر و نگهداری مبتنی بر شرایط را برآورد کردند.

فرولی و همکاران [15]، تمرکز اصلی این پژوهشگران بر روی ارزیابی قابلیت اطمینان تجهیزات معدنی بود. باهدف دستیابی به این هدف، آن‌ها از یک مدل خطرات متناسب استفاده کردند. این مدل، به‌عنوان یک روش تحلیلی کمی، قابلیت اطمینان تجهیزات را باتوجه به خطرات مرتبط با آن‌ها بررسی می‌کند. در این رو یکرد، خطرات متعددی که ممکن است بر تجهیزات معدنی تاثیر بگذارند، شناسایی و ارزیابی می‌شوند و سپس با استفاده از این مدل، میزان خطر و تاثیر آن‌ها بر قابلیت اطمینان تجهیزات مورد بررسی قرار می‌گیرد.

وانگ لو و همکاران [14] ابتدا به محاسبه قابلیت اطمینان بلبرینگ و یاتاقان پرداخته و سپس عمر مفید باقی‌مانده آن‌ها را محاسبه می‌کنند. در این تحقیق، ابتدا معیارهای قابلیت اطمینان بلبرینگ و یاتاقان بررسی شده‌اند. برای این منظور، به تحلیل و بررسی داده‌های مربوط به خرابی و عملکرد بلبرینگ و یاتاقان پرداخته شده است. این تجزیه‌وتحلیل شامل بررسی عوامل مختلف موثر بر قابلیت اطمینان، مانند وضعیت عملیاتی، شرایط محیطی، بار و تنش‌های مورد نیاز و سایر عوامل مهم مرتبط با سیستم بلبرینگ و یاتاقان است.

در مطالعه انجام شده توسط نوری قراحسنلو و همکاران [16]، تلاش شده است تا با استفاده از داده‌های زمانی و شرایط محیطی که به‌عنوان فاکتورهای ریسک مدنظر قرار می‌گیرند، قابلیت اطمینان سیستم لودر معدن مولیبدن–مس در منطقه آذربایجان را محاسبه نمایند.

برای بهبود دقت و قابلیت پیش‌بینی قابلیت اطمینان سیستم لودر، محققان به دنبال مشخص‌کردن تاثیر فاکتورهای ریسک مربوط به زمان و شرایط محیطی بر عملکرد سیستم بودند. با استفاده از داده‌های جمع‌آوری‌شده از معدن مولیبدن – مس آذربایجان و با بهره‌گیری از مدل خطرات متناسب، توانستند قابلیت اطمینان سیستم لودر را به‌صورت دقیق‌تری محاسبه کنند [16].

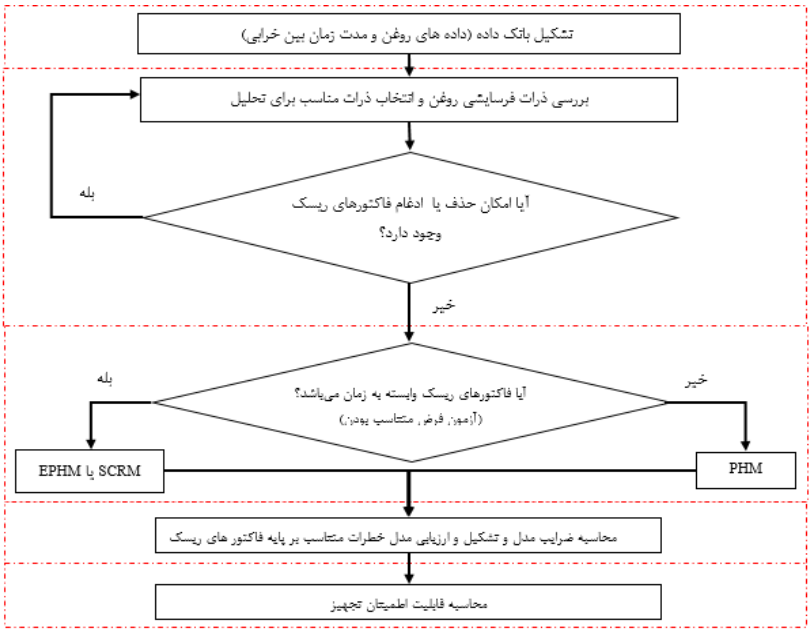
قم قلعه و همکاران [3] به تخمین عمر مفید باقی‌مانده تجهیزات معدن مس سونگون طی ۴ سناریو تصادفی با استفاده از مدل خطرات متناسب و یول پرداختند. نوري قراحسنلو و همکاران [17] بازه‌های نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه[1] برای رسیدن به قابلیت اطمینان ۸۰% در تجهیزات معدن با استفاده از مدل خطرات متناسب به دست آوردند. دیاموتن و همکاران [18] به محاسبه قابلیت اطمینان تجهیزات هوانوردی (با درنظرگرفتن عواملی همچون خستگی و خرابی ناشی از سن هواپیما) با استفاده از مدل خطرات متناسب و یول پرداختند.

[1]Preventive maintenance

۳- روش تحقیق

چارچوب اجرای تحقیق به شرح زیر انجام شده است:

۱. مرحله اول: شناسایی و تعیین مرزهای سیستم بر اساس فرضیات و داده‌های در دسترس.
۲. مرحله دوم جمع‌آوری داده‌ها و استخراج اطلاعات موردنیاز در قالب داده‌های زمانی و فاکتورهای ریسک.
۳. مرحله سوم: ارزیابی فرض متناسب بودن.
۴. مرحله چهارم: تخمین پارامتر تابع برازش و قابلیت اطمینان.


تشکیل بانک داده (داده های روغن و مدت زمان بین خرابی)
بررسی ذرات فرسایشی روغن و انتخاب ذرات مناسب برای تحلیل
آیا امکان حذف یا ادغام فاکتورهای ریسک وجود دارد؟
بله
خیر
آیا فاکتورهای ریسک وابسته به زمان می‌باشد؟ (آزمون: فرض , متناسب بودن:)
بله
خیر
EPHM یا SCRM
PHM
محاسبه ضرایب مدل و تشکیل و ارزیابی مدل خطرات متناسب بر پایه فاکتور های ریسک
محاسبه قابلیت اطمینان تجهیز

شکل ۱- چارچوب تخمین قابلیت اطمینان با استفاده از فاکتورهای ریسک [3].
Figure 1- Estimating reliability using risk factors [3].

۳-۱- شناسایی و مرزبندی سیستم

این مرحله از تحقیق جز مهم‌ترین بخش این تحقیق به شمار می‌رود، زیرا هرگونه اشتباه در مرزبندی بانک داده‌ها منجر به بروز نتایج نادرست خواهد شد. مرزبندی به ترتیب در سطوح مختلفی از واحد، جز زیرسیستم تا خود سیستم انجام می‌شود. در هر سیستم، این سطوح بسته به اطلاعات موجود، دیدگاه‌های متخصصان، پیکربندی سیستم، مشاهدات میدانی و گاه پیشنهادهای سازنده تعیین می‌شود. هر سیستم از چند زیرسیستم، هر زیرسیستم از چند جز و هر جز از چند واحد تشکیل می‌شود. در کارهای تحقیقاتی، سطح اطلاعات موجود عمدتا تعیین‌کننده مرزهاست. برای مثال، اگر در یک ناوگان باربری اطلاعات خرابی کامیون‌ها ثبت شده باشد، کل ناوگان باربری به‌عنوان سیستم و هر کامیون به‌عنوان یک زیرسیستم تحلیل خواهد شد.

۳-۲- تشکیل بانک داده

در فعالیت‌های صنعتی باتوجه‌به گستردگی تجهیزات و نحوه ثبت وقوع حوادث طی بازه عملکرد تجهیزات، مشخص‌کردن داده‌های خرابی، مستلزم شناخت خرابی و انواع آن است. طبق تعریف لدبرو، شکست عبارت است از ناتوانی سیستم در انجام کار مورد انتظاری که استعداد انجام آن را دارد، ولی به دلایل نامعین در حال حاضر از انجام آن عاجز است [3].

۱۹۲ نمونه به ازای ۸ مدل تجهیز با موتورهای دیزلی مشابه، برای آنالیز روغن تجهیزات از بین تمامی داده‌های آنالیز روغن استخراج شده است. این داده‌ها پس از بررسی‌های لازم و پاک‌سازی از اطلاعات نامعتبر و نامرتبط، به شکل نهایی خود درآمده‌اند. داده‌های ارایه‌شده شامل اطلاعات کلیدی

هر نمونه، از جمله شماره گروه، تاریخ نمونه‌گیری، زمان کارکرد روغن، شاخص ویسکوزیته روغن، میزان آلاینده‌ها (برحسب *PPM*) و عملکرد تجهیز (در دسترس‌بودن یا در دسترس نبودن تجهیز) در زمان نمونه‌گیری است. این اطلاعات به ما امکان می‌دهد تا با تحلیل دقیق‌تر داده‌ها، ارتباط بین شرایط روغن و عملکرد تجهیزات را بررسی کرده و به نتایج قابل‌اعتمادی در خصوص قابلیت اطمینان تجهیزات دست یابیم. داده‌های آنالیز روغن به‌عنوان متغیر ریسک در مدل کاکس انتخاب می‌شوند زیرا اطلاعات حیاتی در مورد وضعیت و کارایی موتور ارایه می‌دهند.

آنالیز روغن می‌تواند نشانه‌هایی از فرسایش قطعات موتور، آلودگی‌ها و شرایط عملیاتی نامطلوب را نشان دهد که بر قابلیت اطمینانو عملکرد موتور تاثیر می‌گذارد. به‌عنوان مثال، وجود ذرات فلزی در روغن می‌تواند نشان‌دهنده فرسایش داخلی باشد و تغییرات در خواص فیزیکی و شیمیایی روغن می‌توانند به تشخیص مشکلات احتمالی قبل از وقوع خرابی کمک کنند؛ بنابراین، این داده‌ها برای پیش‌بینی زمان وقوع خرابی و ارزیابی ریسک بسیار مفید هستند و با استفاده از این داده‌ها و روش‌های آماری پیشرفته، می‌توان به تحلیل‌های دقیق‌تری دست پیدا کرد که به بهبود عملکرد و نگهداری تجهیزات کمک می‌کند [19]. در **جدول ۱**، وقوع رویداد خرابی با مقدار صفر و سالم بودن دستگاه در بازه نمونه‌گیری با مقدار یک نمایش داده‌شده است و واحد اندازه‌گیری ذرات فرسایشی روغن برحسب *PPM* و مدت‌زمان بین نمونه‌گیری‌ها برحسب ساعت می‌باشد.

جدول ۱- نمونه داده‌های جمع‌آوری‌شده.
Table 1- Sample data collected.

گروه	تاریخ نمونه‌گیری	رویداد خرابی	مدت‌زمان بین نمونه‌گیری	Fe	Cr	Pb	...
1	1398/01/19	0	1182	24.3	0.6	0.6	...
1	1398/01/19	0	1149	9	0.1	0	...
1	1398/01/19	1	881	8.8	0.2	0.5	...
1	1398/01/19	0	535	20.7	0.5	0.7	...
...	...	...	...	...	...	...	...

پس از بررسی، مشخص شد که متغیرهای ریسک شامل نقره (*Ag*)، باریم (*Ba*)، قلع (*Sn*) و تیتانیوم (*Ti*) و وانادیوم (*V*) تاثیر کمی دارند و بنابراین از داده‌ها حذف شدند تا تحلیل‌های بعدی بر روی متغیرهای بااهمیت بیشتر متمرکز شوند. در مرحله بعد، داده‌های باقی‌مانده نرمال‌سازی شدند تا مقادیر در بازه‌ای یکنواخت، معمولا بین صفر تا یک، قرار گیرند. برای این کار، از روش *Minimax* استفاده شد که مقادیر کوچک‌ترین متغیر را به صفر و بزرگ‌ترین را به یک تبدیل کرده و مقادیر دیگر را به‌تناسب بین این دو قرار می‌دهد.

۳-۳- ارزیابی فرض متناسب بودن

پس از واردکردن داده‌ها در نرم‌افزار *Stata* و اجرا کردن اولیه مدل خطرات متناسب، در این مرحله، برای اطمینان از عدم وابستگی به زمان فاکتورهای ریسک مشهود، باید فرض متناسب بودن نرخ مخاطره (*PH*) در هر دو سمت مورد ارزیابی قرار گیرد. برای ارزیابی فرض متناسب بودن درباره هر یک از فاکتورهای ریسک، می‌توان از آزمون‌های تحلیلی و ترسیمی استفاده کرد. آزمون‌های تحلیلی با ارایه آماره‌های استاتیکی[1] (آماره‌های استاتیکی در مدل‌های خطرات متناسب برای ارزیابی فرضیه‌ها و اطمینان از تطبیق صحیح مدل با فاکتورهای ریسک استفاده می‌شوند.) و مقدار *p-value*، به ارزیابی فرض متناسب بودن پرداخته و این آزمون‌ها می‌توانند ارزیابی راحت‌تری را با استفاده از منطق ریاضی ارایه دهند. یکی از آزمون‌های تحلیلی پرکاربرد در این زمینه، آزمون هارل و لی است که حالت تغییریافته‌ای از آزمون شوئنفلد است و به‌عنوان آزمون "باقیمانده‌های شوئنفلد" معروف است. استفاده از *p-value* در این روش، نتایج را جذاب‌تر می‌کند و امکان ارزیابی را با استفاده از منطق ریاضی فراهم می‌کند. اگر*p-value* معنادار بزرگ‌تر از ۰/۱ باشد، این نشان می‌دهد که فرض متناسب بودن قابل‌قبول است؛ اما اگر *p-value* کوچک‌تر از ۰/۱ باشد، این نشان می‌دهد که فرض متناسب بودن رد شده است، به‌عبارت‌دیگر، آزمون فرض صفر نشان می‌دهد که در صورت برقراری فرض متناسب بودن، باقیمانده‌های شوئنفلد همبستگی با زمان نخواهند داشت ($H0: \rho = 0$) و در صورت رد فرض صفر، فرض متناسب بودن نیز رد خواهد شد [3].

[1] Statistical Statistics

برای داده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا مدل را اجرا می‌کنیم و سپس تست فرض متناسب بودن را اجرا می‌کنیم که جزییات تست فرض متناسب بودن به شرح **شکل ۲** می‌باشد.

	rho	chi2	df	Prob>chi2
Fe	-0.07830	0.91	1	0.3390
Cr	-0.13658	2.75	1	0.0975
Pb	-0.10411	0.73	1	0.3933
Cu	0.25298	5.98	1	0.0144
Al	0.03346	0.09	1	0.7609
Ni	0.18290	3.94	1	0.0472
Si	-0.01747	0.03	1	0.8704
B	0.07238	0.50	1	0.4794
Na	-0.03826	0.13	1	0.7200
Mg	0.06203	0.20	1	0.6586
Ca	0.11521	1.11	1	0.2914
P	-0.06362	0.30	1	0.5850
Zn	-0.06357	0.39	1	0.5348
Mo	0.10670	0.77	1	0.3812
PQ	0.07938	0.39	1	0.5316
Vis40	-0.05028	0.19	1	0.6603
Global test		14.12	16	0.5897

شکل ۲- ارزیابی فرض متناسب بودن برای ۱۶ متغیر.

Figure 2- Evaluation of the proportionality assumption for 16 variables.

در **شکل ۲** تمامی متغیرها مقدار *p_value* آن‌ها به‌جز متغیرهای کروم و مس و نیکل، بالای ۰/۱ می‌باشد و اگر این مقدار زیر ۰/۱ باشد متغیر ریسک وابستگی با سایر متغیرها دارد و باید از لیست متغیرهای موردمطالعه حذف شود تا انحرافی در نتایج رخ ندهد و نتیجه نهایی این آزمون باید بین ۰/۵ و ۱ باشد که مقدار این آزمون در خروجی بالا مقدار ۰/۵۸۹۷ را به ازای ۱۶ متغیر ریسک به ما نشان می‌دهد. پس از حذف متغیرها ارزیابی فرض متناسب بودن به شرح **شکل ۳** می‌باشد.

	rho	chi2	df	Prob>chi2
Fe	-0.09006	0.87	1	0.3521
Pb	0.01264	0.01	1	0.9178
Al	-0.00557	0.00	1	0.9598
Si	-0.02083	0.03	1	0.8696
B	0.07838	0.57	1	0.4522
Na	-0.04746	0.21	1	0.6449
Mg	0.03686	0.06	1	0.8028
Ca	0.11550	0.89	1	0.3450
P	-0.02815	0.06	1	0.8005
Zn	-0.04867	0.22	1	0.6401
Mo	0.09850	0.62	1	0.4292
PQ	0.05897	0.25	1	0.6198
Vis40	-0.07244	0.35	1	0.5546
Global test		6.04	13	0.9448

شکل ۳- ارزیابی فرض متناسب بودن برای ۱۳ متغیر باقیمانده.

Figure 3- Assessment of the proportionality assumption for the remaining 13 variables.

اکنون تمامی متغیرها مقدار *p_value* آن‌ها بالای ۰/۱ می‌باشد و به این معنی می‌باشد که تمام متغیرهای باقیمانده فرض متناسب بودن را برآورده می‌کنند و نتیجه نهایی این آزمون باید بین ۰/۵ و ۱ باشد که مقدار این آزمون در خروجی بالا مقدار ۰/۹۴۴۸ را به ازای ۱۳ متغیر ریسک به ما نشان می‌دهد که این افزایش دقت تقریبا ۴۰ درصدی به دلیل حذف متغیرهایی است که مقدار *p_value* آن‌ها در مرحله قبل زیر ۰/۱ بود.

۴-۳- تخمین پارامترهای تابع برازش شده و محاسبه قابلیت اطمینان

پس از حذف متغیرهایی که فرض متناسب بودن را برآورده نمی‌کردند اکنون نوبت به محاسبه و صحت‌سنجی ضرایب مدل می‌باشد. ابتدا برای هر گروه به تفکیک، ضرایب را محاسبه کرده و سپس با استفاده از آزمون والد اقدام به حذف ضرایبی که نسبت به مدل پایه (مدل بدون فاکتور ریسک) تاثیری در بقای تجهیز (قابلیت اطمینان) ندارند، می‌کنیم.

ضرایب گروه اول و دوم به ترتیب به شرح **شکل ۴** و **شکل ۵** می‌باشد.

No. of subjects = 104 — Number of obs = 104
No. of failures = 55
Time at risk = 91,380
LR chi2(13) = 14.97
Log likelihood = -183.54692 — Prob > chi2 = 0.3095

_t	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|	[95% conf.	interval]
Fe	-3.485921	1.967847	-1.77	0.076	-7.342831	.3709888
Pb	-1.670313	2.508974	-0.67	0.506	-6.587811	3.247186
Al	-2.806484	4.016173	-0.70	0.485	-10.67804	5.065072
Si	-3.899677	1.467042	-2.66	0.008	-6.775026	-1.024327
B	.2096002	1.059045	0.20	0.843	-1.86609	2.28529
Na	-.2137847	.8848919	-0.24	0.809	-1.948141	1.520572
Mg	6.893188	4.848616	1.42	0.155	-2.609924	16.3963
Ca	-5.13233	6.607017	-0.78	0.437	-18.08184	7.817184
P	.0064617	3.149737	0.00	0.998	-6.166909	6.179833
Zn	4.613946	4.470113	1.03	0.302	-4.147314	13.37521
Mo	.3079463	.9497656	0.32	0.746	-1.55356	2.169453
PQ	3.262796	3.222684	1.01	0.311	-3.053548	9.57914
Vis40	.841287	1.096215	0.77	0.443	-1.307254	2.989828

شکل ۴- ضرایب فاکتورهای ریسک برای گروه اول تجهیزات.

Figure 4- Risk factor coefficients for the first group of equipment.

No. of subjects = 88 — Number of obs = 88
No. of failures = 22
Time at risk = 81,775
LR chi2(13) = 25.19
Log likelihood = -66.182039 — Prob > chi2 = 0.0218

_t	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|	[95% conf.	interval]
Fe	16.87736	5.553653	3.04	0.002	5.992402	27.76232
Pb	-12.51109	5.864278	-2.13	0.033	-24.00486	-1.017319
Al	34.02559	15.52025	2.19	0.028	3.606463	64.44472
Si	-22.38074	10.09793	-2.22	0.027	-42.17232	-2.589173
B	11.62826	10.81929	1.07	0.282	-9.577155	32.83368
Na	-.5287486	2.332444	-0.23	0.821	-5.100256	4.042758
Mg	-2.136069	1.671006	-1.28	0.201	-5.411181	1.139042
Ca	-2.886509	3.016856	-0.96	0.339	-8.799439	3.02642
P	-2.909174	4.364553	-0.67	0.505	-11.46354	5.645192
Zn	3.864843	5.322524	0.73	0.468	-6.567112	14.2968
Mo	-1.309782	1.951618	-0.67	0.502	-5.134883	2.515319
PQ	-18.10287	6.447628	-2.81	0.005	-30.73999	-5.465749
Vis40	.5942784	1.808688	0.33	0.742	-2.950685	4.139242

شکل ۵- ضرایب فاکتورهای ریسک برای گروه دوم تجهیزات.

Figure 5- Risk factor coefficients for the second group of equipment.

در خروجی به‌دست‌آمده باید ۲ مقدار *Prob > chi2* و مقدار ستون $P > |Z|$ (مقدار *p_value* متغیرهای ریسک) باید زیر ۰/۱ باشد که برعکس فرض صفر و فرض یک تست باقیمانده شئونفلد در اینجا باید مقدار *p_value* چه برای مدل و چه برای متغیرها زیر ۰/۱ باشد تا مدل و متغیرها نسبت به مدل پایه تفاوت معنی‌داری در محاسبه بقا داشته باشند.

پس از محاسبه ضرایب هر گروه متوجه می‌شویم که *Prob> chi2* (کادر قرمزرنگ موجود در **شکل‌های ۴ و ۵**) مقدار احتمال مربوط به آماره تست نسبت احتمال (۰/۳۰۹۵) برای گروه اول و (۰/۰۲۱۸) برای گروه دوم که این مقادیر نشان می‌دهند که برای گروه اول این مقدار بیش از ۰/۱ می‌باشد و مدل به‌طور کلی برای گروه اول معنادار نیست. اکنون برای حذف و صحت‌سنجی ضرایب آزمون والد را انجام می‌دهیم تا ضرایب باقیمانده نسبت به مدل پایه تفاوت معنی‌داری در بقای تجهیز ایجاد کنند.

در این قسمت نیز می‌توان با استفاده از نظر خبرگان اقدام به حذف متغیرها نمود یا هنگام اجرای مدل تعدادی متغیر ثابت به نرم‌افزار داد تا تحت هر شرایطی این متغیرها را از مدل حذف نکند؛ اما ما در این قسمت آزمون والد را بدون هیچ محدودیتی اجرا می‌کنیم که خروجی آن به شرح **شکل ۶** برای گروه اول و **شکل ۷** برای گروه دوم می‌باشد.

No. of subjects = 104 — Number of obs = 104
No. of failures = 55
Time at risk = 91,380
LR chi2(3) = 10.89
Log likelihood = -185.58634 — Prob > chi2 = 0.0124

_t	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|	[95% conf.	interval]
Fe	-2.966235	1.672315	-1.77	0.076	-6.243911	.3114415
Si	-3.35619	1.227852	-2.73	0.006	-5.762735	-.9496446
PQ	2.872568	1.060498	2.71	0.007	.7940293	4.951107

شکل ۶- ضرایب فاکتورهای ریسک برای گروه اول تجهیزات پس از آزمون والد.

Total 6- Risk factor coefficients for the first group of equipment after the parent test.

No. of subjects = 88 — Number of obs = 88
No. of failures = 22
Time at risk = 81,775
LR chi2(5) = 22.07
Log likelihood = -67.742644 — Prob > chi2 = 0.0005

_t	Coefficient	Std. err.	z	P>|z|	[95% conf.	interval]
Fe	17.07569	4.990924	3.42	0.001	7.293661	26.85772
Pb	-13.23703	5.327193	-2.48	0.013	-23.67814	-2.795925
Al	33.29791	14.04704	2.37	0.018	5.766227	60.8296
Si	-21.5282	9.008329	-2.39	0.017	-39.1842	-3.872201
PQ	-18.48348	6.382832	-2.90	0.004	-30.9936	-5.973364

شکل ۷- ضرایب فاکتورهای ریسک برای گروه دوم تجهیزات پس از آزمون والد.

Figure 7- Risk factor coefficients for the second group of equipment after the parent test.

پس از حذف متغیرها و اجرای مدل مقدار *Prob > chi2* برای هر دو گروه به زیر ۰/۱ رسید و مقدار *p_value* متغیرها نیز به زیر ۰/۱ رسید و تفاوت معنی‌داری بین مدل پایه و مدل فعلی ایجاد شد.

۱-۴-۳- تئوری محاسبات قابلیت اطمینان

قابلیت اطمینان: قابلیت اطمینان به توانایی سیستم در انجام کار موردنظر در زمان و شرایط مشخص اشاره دارد و خرابی به‌عنوان عدم توانایی قطعه یا ابزار در انجام وظایف تعریف می‌شود. داده‌های خرابی شامل زمان بین خرابی‌ها و زمان تا وقوع خرابی هستند. در مباحث تعمیرپذیری، زمان‌های مرتبط با انجام تعمیرات نیز بررسی می‌شود. تعریف ریاضی قابلیت اطمینان *R(t)* به‌تفصیل آمده است.

$$R\ t) = P\ T\ >\ t), \qquad (۱)$$

$$R\ t) = 1 - F\ t) = 1 - \int_0^t f\ t)\ dt, \qquad (۲)$$

که در آن

۱. $R(t)$: قابلیت اطمینان سیستم
۲. $F(t)$: تابع توزیع احتمال خرابی سیستم
۳. $f(t)$: تابع چگالی احتمال

باتوجه به مفهوم فوق، می‌توان قابلیت اطمینان را به‌عنوان توانایی سیستم در انجام کار موردنظر در زمان مشخص و تحت شرایط مشخص تعریف کرد. همچنین، اطلاعات خرابی که غالبا به شکل زمانی ارایه می‌شوند، در مفاهیم مرتبط باقابلیت اطمینان و تعمیرپذیری استفاده می‌شوند [3].

در **رابطه (۲)**، فرمول $R(t)$ برای تعریف قابلیت اطمینان استفاده می‌شود. این فرمول نشان می‌دهد که قابلیت اطمینان سیستم، برابر با تفاضل یک و احتمال تجمعی خرابی تا زمان t است [19].

مدل خطرات متناسب در تجزیه‌وتحلیل داده‌های قابلیت اطمینان، معمولا با یک مشکل مواجه می‌شویم که تمام بخش‌های داده‌ها در شرایط یکسان جمع‌آوری نشده‌اند. به عبارتی دیگر، ممکن است یک قطعه تجهیزات در شرایط مختلفی استفاده شده باشد و شرایطی نظیر سن یا وضعیت تغییر متفاوتی داشته باشد. این عوامل به‌طور واضح بر ویژگی‌های قابلیت اطمینان تجهیزات تاثیر می‌گذارند؛ بنابراین، جداسازی اثرات این عوامل به‌منظور برآورد تاثیر آن‌ها امری ضروری است.

برای جداسازی اثرات این عوامل، نیازمند شناسایی و کمی‌سازی آن‌ها با استفاده از متغیرهای عددی هستیم که به‌طور معمول به‌عنوان متغیرهای کمکی، متغیرهای هم‌زمان، تشخیصی یا توضیحی شناخته می‌شوند. این متغیرها می‌توانند ثابت باشند (مانند طرح یا مواد استفاده‌شده) یا ممکن است در طول زمان تغییر کنند (مثلا عامل تنش انباشته در یک جز). استفاده از این متغیرهای عددی به ما امکان می‌دهد تا تاثیر عوامل مختلف را به‌طور جداگانه شناسایی کرده و برآورد کنیم. این روش می‌تواند برای بررسی تاثیرات تغییرات متغیرهای شرایطی بر قابلیت اطمینان تجهیزات مورداستفاده قرار گیرد [4] گونه‌های متفاوتی از استفاده از این مدل در تحقیقات مختلف مطرح شده است. بااین‌حال همگی آن‌ها شامل یک تابع نرخ خرابی پایه به همراه جز دیگری است که عهده‌دار تبیین ارتباط داده‌ها با تابع مذکور است. درصورتی‌که تابع نرخ خرابی پایه را ناشناس (فرض اصلی مدل خطرات متناسب که در نرم‌افزار با استفاده از برآوردگر برسلوتخمین زده شده است). فرض کنیم تابع نرخ خرابی توأم به‌صورت **رابطه (۳)** خواهد بود:

$$h\left(t, Z\ t\right)\ = h_0\left(t, Z\ t\right) * \exp\left(\sum_{i=1}^{m} y_i Z_i\ t\right). \qquad (۳)$$

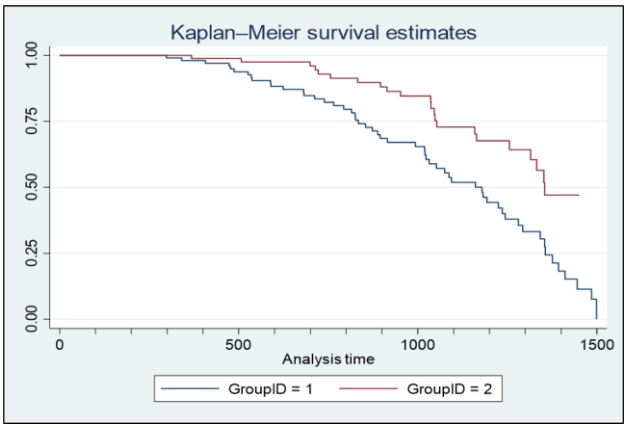
هر یک از $Z_i(t)$ فاکتورهای ریسک و یا متغیرهای تشخیص خرابی، معرف یکی از پارامترهای اندازه‌گیری شده در زمان t در پروسه پایش وضعیت (مثلا ارتعاش در یک شفت و یا میزان آهن در روغن و ...) است. این اطلاعات از وضعیت دستگاه را همگام نیز می‌نامند. مقادیر y_i متناظر با هر یک از همگام‌ها نشان‌دهنده درجه تاثیر این عوامل هستند. در تحقیق فعلی تابع قابلیت اطمینان گروه اول به شرح زیر می‌باشد:

$$R(t,x) = (R_0(t))^{\exp\left((17.07 \times X_{Fe})+(-13.23 \times X_{Pb})+(33.29 \times X_{Al})+(-21.52 \times X_{Si})+(-18.48 \times X_{Pq})\right)}$$

و تابع قابلیت‌اطمینان گروه دوم نیز به شرح زیر می‌باشد:

$$R(t,x) = (R_0(t))^{\exp\left((-2.96 \times X_{Fe})+(-3.35 \times X_{Si})+(2.87 \times X_{PQ})\right)}$$

پس از محاسبه و صحت‌سنجی ضرایب اکنون نوبت به‌رسم نمودار قابلیت اطمینان (**شکل ۸**) و سپس محاسبه قابلیت اطمینان تجهیزات دو گروه می‌رسد که خلاصه‌ای از آن به شرح **جدول ۲** می‌باشد (ریزتغییرات قابلیت اطمینان به‌صورت کامل در پیوست آمده است).



شکل ۸- نمودار قابلیت اطمینان برای دو گروه تجهیزات.

Figure 8- Reliability diagram for two equipment groups.

جدول ۲- تغییرات قابلیت اطمینان در زمان (برحسب ساعت).
Table 2- Reliability changes over time (in hours).

بازه قابلیت اطمینان	مدل خطر متناسب	
گروه	اول	دوم
%75	830	1159
%50	1090	1352
%25	1345	-

بر اساس داده‌های ارایه‌شده در جدول فوق، تجهیزات گروه اول پس از ۸۳۰ ساعت به قابلیت اطمینان ۷۵% دست می‌یابند، درحالی‌که تجهیزات گروه دوم پس از ۱۱۵۹ ساعت به همین سطح از قابلیت اطمینان می‌رسند که نشان از وضعیت بهتر تجهیزات گروه دوم تجهیزات می‌باشد چراکه تجهیزات گروه دوم عمدتا سن پایین‌تری نسبت به تجهیزات گروه اول داشته یا این‌که به تازگی تعمیرات اساسی[1] را پشت سر گذاشته‌اند و این امر در مدل اجزا شده مشهود می‌باشد.

باتوجه به اینکه بازه زمانی ذخیره‌سازی داده‌های مربوط به ساعت کاری روغن بیش از ۱۵۰۰ ساعت نیست، تجهیزات گروه دوم، همان‌طور که در تصویر شماره ۸ نشان داده شده است، پس از ۱۵۰۰ ساعت به قابلیت اطمینان ۴۷% دست می‌یابند و در این بازه زمانی به سطح قابلیت اطمینان ۲۵% نمی‌رسند. برای مطالعات دقیق‌تر در حوزه تخمین مقادیر می‌توان به ویلوک و همکاران [20] و کالفلیش [21] مراجعه کرد. در نرم‌افزارهای نگهداری و تعمیر نظیر *SAS* و *S_plus* نیز امکاناتی برای تخمین تابع مدل خطرات متناسب، هم به‌صورت پارامتریک، نظیر تحلیل ویبول و هم به‌صورت غیرپارامتریک درنظر گرفته شده است [19].

جان اوکیگلی[2] در کتاب خود تحت عنوان رگرسیون خطرات متناسب[3] به تفضیل به بررسی آنالیز بقا، روش تخمین پارامترها و شرح مدل خطرات متناسب پرداخته است [22].

۴- مزایا و چالش‌های مدل خطرات متناسب

۴-۱- مزایا

انعطاف‌پذیری در تابع خطر پایه *PHM*[4]: نیازی به فرضیات خاص در مورد شکل یا ماهیت تابع خطر پایه ندارد و هر نوع تابع توزیع را می‌توان به‌عنوان تابع خطر پایه استفاده کرد. این امر به معنای قابلیت استفاده این روش برای تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات در حوزه‌های مختلف مهندسی است. همچنین، این روش دارای ویژگی‌های جهانی بودن، انعطاف‌پذیری و سادگی است.

مدل‌کردن مستقیم نرخ شکست *PHM*: به‌طور مستقیم نرخ شکست را مدل می‌کند و این باعث می‌شود که تفسیر قوی‌تری داشته باشد. ارتباط بین میزان خرابی و اطلاعات نظارت بر وضعیت ایجاد می‌شود که این امر امکان استفاده بهتر از اطلاعات نظارت بر وضعیت را برای به‌روزرسانی وضعیت تجهیزات فراهم می‌کند. همچنین، تاثیر متغیرهای کمکی مختلف بر میزان کل شکست به‌راحتی قابل‌ارزیابی است.

مدل‌سازی تاثیر عوامل مختلف *PHM*: می‌تواند تاثیر چندین عامل داخلی و خارجی بر خرابی تجهیزات را مدل کند، از جمله عوامل محیطی، عوامل پیری و عوامل تخریب. به‌این‌ترتیب، *PHM* زمانی قابل‌اجرا است که خرابی تجهیزات به عوامل مؤثر متعدد و مرتبط باشد.

دقت پیش‌بینی با محدودیت داده‌ها: در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر داده، *PHM* می‌تواند با استفاده از تعداد کمی از داده‌های تخریب‌شده به نتایج مدل‌سازی خوبی دست یابد. با افزایش تعداد رویدادهای جمع‌آوری‌شده و داده‌های نظارت بر وضعیت، دقت پیش‌بینی وضعیت تجهیزات

[1] Overhaul
[2] John o'quigley
[3] Proportional hazards regression
[4] Proportional Hazard Model (PHM)

بهبود می‌یابد. ازاین‌رو، *PHM* به‌عنوان یک روش قدرتمند در تحلیل و پیش‌بینی خرابی تجهیزات استفاده می‌شود و با مزایای فوق قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و دقت را در تجزیه‌وتحلیل قابلیت اطمینان تجهیزات فراهم می‌کند [23].

۲-۴- چالش‌ها

مشکلات و چالش‌هایی که در حال حاضر برای *PHM* وجود دارند، به شرح زیر هستند:

فرض تناسب: استفاده از *PHM* نیازمند برآورد فرضیه تناسب است که به‌صورت یک مدل ثابت مشخص می‌شود. این فرضیه تناسب باید تاثیر فرآیند تخریب را بر روی نرخ شکست تجهیزات را برآورد کند که این نیاز ممکن است نسبتا پیچیده باشد.

تعیین متغیرهای کمکی *PHM*: قادر است تاثیرات چندین متغیر کمکی را به‌طور هم‌زمان در نظر بگیرد. بااین‌حال، اگر یک متغیر کمکی حذف شود یا دقت اندازه‌گیری متغیر کمکی متفاوت باشد، نتایج تخمین پارامترها ممکن است نادقیق باشد. همچنین، برای اینکه *PHM* به‌درستی عمل کند، باید به‌صورت صحیح با همبستگی بین متغیرهای کمکی مرتبط در فرآیند تخریب تجهیزات موردنظر روبرو شود.

آمیختگی داده‌ها: ادغام صحیح اطلاعات از منابع داده مختلف، مانند سیگنال‌های ارتعاشی، سیگنال‌های جریان و سیگنال‌های روغن، برای سیستم‌های پیچیده چالشی است. در سیستم‌های پیچیده، فرآیندهای چندمتغیره وجود دارند. برای تضمین دقت پیش‌بینی وضعیت سیستم، باید تحقیقات بیشتری در مورد روش‌های مناسب برای آمیختگی داده‌ها و ایجاد یک ساختار ترکیبی منطقی انجام شود.

پیچیدگی محاسباتی: محاسبه *PHM* درصورتی‌که فرآیند تخریب سیستم دارای متغیرهای کمکی متعددی باشد، مشکلاتی ایجاد می‌کند. محاسبه داده‌های با ابعاد بالا چالش‌هایی همراه دارد و بار محاسباتی را افزایش می‌دهد.

مشکلات حاصل از جمع‌آوری داده‌ها: جمع‌آوری هم‌زمان داده‌های رویداد و داده‌های نظارت بر وضعیت در کاربردهای عملی مشکل است، به‌خصوص برای سیستم‌های باقابلیت اطمینان بالا و تجهیزات حیاتی که ممکن است به خرابی نیافتند. این مسئله باعث کاهش تعداد نمونه‌های غیر موفق می‌شود و مانعی برای روش‌های مبتنی بر داده محسوب می‌شود [24].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای ارزیابی فرض متناسب بودن از آزمون هارل و لی که یک شکل اصلاح شده از *GOF* آزمون شوئنفلد به نام "آزمون باقی‌مانده‌های شوئنفلد" است، استفاده شده است. این روش جذاب‌تر است زیرا نتایج را بر اساس مقادیر *p_value* ارایه می‌دهد و ارزیابی آسان‌تری با استفاده از منطق ریاضی فراهم می‌کند. پس از ارزیابی‌ها و باقی‌ماندن متغیرهای کمکی (فاکتورهای ریسک) مناسب اقدام به محاسبه ضرایب مدل شد و ضرایب به‌دست‌آمده از طریق آزمون والد اعتبارسنجی شدند. پس‌ازاین مرحله اقدام به محاسبه قابلیت اطمینان و رسم نمودارهای آن شد و جدول ریز تغییرات قابلیت اطمینان دو گروه در پیوست موجود است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که درنظرگرفتن فاکتورهای ریسک می‌تواند منجر به محاسبه دقیق‌تر قابلیت اطمینان موتورهای دیزل شود. این امر به‌ویژه برای بهبود برنامه‌ریزی در زمینه نگهداری و تعمیرات بسیار مؤثر است. در این پژوهش، تغییرات قابلیت اطمینان در دو گروه مختلف موتور دیزل بررسی شد. گروه اول شامل تجهیزاتی بود که به دلیل سن بالا و کارکرد طولانی‌تر، دچار فرسودگی و نیاز به تعمیرات بیشتر بودند، درحالی‌که گروه دوم شامل تجهیزاتی بود که یا نسبتا جدید بودند یا به‌تازگی تعمیرات اساسی را گذرانده بودند. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که گروه اول پس از ۷۹۰ ساعت کارکرد به سطح ۸۰% قابلیت اطمینان می‌رسد، درحالی‌که گروه دوم که شامل موتورهای جدیدتر یا تعمیر شده بود، برای رسیدن به همین سطح از قابلیت اطمینان، نیاز به ۱۰۵۰ ساعت کارکرد داشت. این تفاوت در زمان دستیابی به قابلیت اطمینان ۸۰% به‌وضوح نشان‌دهنده تاثیرات قابل‌توجه سن، ساعت کارکردی و وضعیت تعمیرات اساسی بر قابلیت اطمینان تجهیزات است. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که عوامل مختلف مانند سن تجهیزات و میزان تعمیرات انجام شده، نقش حیاتی در تعیین قابلیت اطمینان دارند و لازم است این عوامل در برنامه‌ریزی برای نگهداری و تعمیرات در نظر گرفته شوند. به‌طورکلی، این نتایج می‌توانند به بهبود استراتژی‌های نگهداری و تعمیرات کمک کنند و از خرابی‌های غیرمنتظره جلوگیری نمایند.

۱-۵- پیشنهادها

۱. ارزیابی هزینه-اثربخشی روش‌های پایش وضعیت در مقایسه با روش‌های سنتی نگهداری: تحلیل هزینه-اثربخشی روش‌های پایش وضعیت و مقایسه آن‌ها با روش‌های سنتی نگهداری و تعمیرات برای بهبود بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها.

۲. تحلیل استفاده از مدل‌های ترکیبی برای بهبود پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان: بررسی امکان ترکیب مدل‌های مختلف پیش‌بینی، مانند *PHM* و مدل‌های یادگیری ماشین، برای افزایش دقت و قابلیت اطمینان پیش‌بینی‌ها، استفاده از دیگر مدل‌های بقا برای تجهیزات و مقایسه آن‌ها با یکدیگر.

۳. بررسی امکان ترکیب داده‌های تاریخی و داده‌های آنلاین پایش وضعیت برای بهبود دقت پیش‌بینی‌های قابلیت اطمینان.

۴. درنظرگرفتن میزان فرسایش ذرات موجود در روغن باتوجه به سن و سوابق تعمیراتی تجهیز به‌عنوان یکی از فاکتورهای ریسک.

۵. مطالعه و تحلیل عمر مفید قطعات مختلف موتور دیزل با استفاده از داده‌های ذرات فرسایشی.

۶. مقایسه روش تحلیل ذرات فرسایشی با سایر روش‌های پایش سلامت موتور مانند آنالیز ارتعاشات یا تحلیل گازهای خروجی.

۷. بررسی تاثیر نوع و کیفیت روغن‌موتور بر تولید ذرات فرسایشی و قابلیت اطمینان موتور. مطالعه تاثیر افزودنی‌های روغن‌موتور و توسعه فرمولاسیون‌های جدید روغن می‌تواند به بهبود طول عمر و عملکرد موتور کمک کند.

منابع

[1] Lorna Wong, E., Jefferis, T., & Montgomery, N. (2010). Proportional hazards modeling of engine failures in military vehicles. *Journal of quality in maintenance engineering*, *16*(2), 144–155. https://doi.org/10.1108/13552511011048896

[2] Sharma, G., Sahu, P. K., & Rai, R. N. (2022). Imperfect maintenance and proportional hazard models: a literature survey from 1965 to 2020. *Life cycle reliability and safety engineering*, *11*(1), 87–103.

[3] Qaleh, A. Q., Kakaei, R., Ataei, M., Qarahasanloo, A. N., & Barabadi, A. (2022). The impact of environmental conditions on estimating the remaining useful life of reliability in the Sun Copper Mine. *Mining engineering*, *17*(55), 47-61. (**In Persian**). https://elmnet.ir/doc/2661604-81032?elm_num=1

[4] Kumar, D., & Klefsjö, B. (1994). Proportional hazards model: a review. *Reliability engineering & system safety*, *44*(2), 177–188. https://doi.org/10.1016/0951-8320(94)90010-8

[5] Lowe, P. H., & Lewis, W. (1983). Reliability analysis based on the Weibull distribution: an application to maintenance float factors. *The international journal of production research*, *21*(4), 461–470. https://doi.org/10.1080/00207548308942382

[6] Dolas, D. R., & Deshmukh, S. (2015). Reliability ananlysis of cooling system of diesel engine. *Universal journal of mechanical engineering*, *3*(2), 57–62. https://www.hrpub.org/journals/article_info.php?aid=2415

[7] Bhardwaj, S., Bhardwaj, N., & Kumar, V. (2019). The study of reliability of diesel locomotive engine using weibull distribution. *International journal of agricultural and statistical sciences*, *15*(2), 549–554. https://B2n.ir/uh3573

[8] Nnaji, O. E., Nkoi, B., Lilly, M. T., & Le-ol, A. K. (2020). Evaluating the reliability of a marine diesel engine using the Weibull distribution. *Journal of newviews in engineering and technology (JNET)*, *2*(2), 1–9. https://www.rsujnet.org/wp-content/uploads/2023/03/JNET2020201.pdf

[9] Zhang, J., Liwen, G. U. O., Peiyang, S. U., & Jia, J. I. A. (2022). *Evaluating the reliability of emergency control equipment based on the Weibull distribution*. http://dx.doi.org/10.21203/rs.3.rs-1476973/v1

[10] Cox, D. R. (1972). Regression Models and Life-Tables. *Journal of the royal statistical society: Series B (methodological)*, *34*(2), 187–202. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x

[11] Jardine, A. K. S., Anderson, P. M., & Mann, D. S. (1987). Application of the Weibull proportional hazards model to aircraft and marine engine failure data. *Quality and reliability engineering international*, *3*(2), 77–82. https://doi.org/10.1002/qre.4680030204

[12] Ghodrati, B. (2006). Weibull and exponential renewal models in spare parts estimation: a comparison. *International journal of performability engineering*, *2*(2), 135–147. https://doi.org/10.23940/ijpe.06.2.p135.mag

[13] Ghodrati, B., Kumar, U., & Kumar, D. (2003). Product support logistics based on product design characteristics and operating environment. *Annual international logistics conference and exhibition: 12/08/2003-14/08/2003*. Society of Logistics Engineers. https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2:1000685

[14] Ghodrati, B., & Kumar, U. (2004). Operating Environment Based Maintenance and Spare Parts Planning: A Case Study. In *Advanced reliability modeling* (pp. 125–132). World Scientific. https://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/9789812702685_0017

[15] Ghodrati, B., & and Kumar, U. (2005). Operating environment-based spare parts forecasting and logistics: a case study. *International journal of logistics research and applications*, *8*(2), 95–105. https://doi.org/10.1080/13675560512331338189

[16] Ghodrati, B., Benjevic, D., & Jardine, A. (2012). Product support improvement by considering system operating environment: A case study on spare parts procurement. *International journal of quality & reliability management*, *29*(4), 436–450. https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/02656711211224875/full/html

[17] Barabadi, A., Barabady, J., & Markeset, T. (2011). A methodology for throughput capacity analysis of a production facility considering environment condition. *Reliability engineering & system safety*, *96*(12), 1637–1646. https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.09.001

[18] Wang, L., Zhang, L., & Wang, X. (2015). Reliability estimation and remaining useful lifetime prediction for bearing based on proportional hazard model. *Journal of central south university*, *22*(12), 4625–4633. https://doi.org/10.1007/s11771-015-3013-9
[19] Furuly, S., Barabadi, A., & Barabady, J. (2013). Reliability analysis of mining equipment considering operational environments: A case study. *International journal of performability engineering*, *9*(3), 287. https://www.ijpe-online.com/EN/Y2013/V9/I3/287
[20] Gharahasanlou, A. N., Ataei, M., Khaloukakai, R., Fatourchi, S., & Barabadi, R. (2019). The impact of environmental conditions on the reliability of mining equipment: a case study of the Azerbaijan molybdenum-copper mine. *Analytical and numerical methods of mining engineering*, *9*, 129-141. (**In Persian**). https://elmnet.ir/doc/1973608-11561?elm_num=1
[21] Nouri Qarahasanlou, A., Ataei, M., & Shakoor Shahabi, R. (2021). Expected proportional hazard model in preventive maintenance. *Journal of mining and environment*, *12*(3), 753–767. https://doi.org/10.22044/jme.2021.10812.2051
[22] Diamoutene, A., Noureddine, F., Kamsu-Foguem, B., & Barro, D. (2021). Reliability analysis with proportional hazard model in aeronautics. *International journal of aeronautical and space sciences*, *22*(5), 1222–1234. https://colab.ws/articles/10.1007%2Fs42405-021-00371-1
[23] Ramazani, S., & Sadighi, M. (2014). *The practical handbook of maintenance management*. Shahid Dastwara University.
[24] Vlok, P. J., Coetzee, J. L., Banjevic, D., Jardine, A. K. S., & Makis, V. (2002). Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the operational research society*, *53*(2), 193–202. https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601261
[25] Kalbfleisch, J. D., & Prentice, R. L. (2002). *The statistical analysis of failure time data*. John Wiley & Sons.
[26] O'Quigley, J. (2008). *Proportional Hazards Regression*. Springer New York, NY.
[27] Duan, C., & Song, L. (2023). A Study of Proportional Hazards Models: Its Applications in Prognostics. In *Maintenance management-current challenges, new developments, and future directions*. IntechOpen. https://www.intechopen.com/chapters/83047

پیوست

تغییرات قابلیت اطمینان برای دو گروه تجهیزات به شرح زیر است:

جدول الف-۱- تغییرات قابلیت اطمینان گروه اول.

Table A1- Table 1- Changes in reliability of the first group.

ردیف	زمان	قابلیت اطمینان	ردیف	زمان	قابلیت اطمینان
1	282	1.0000	26	633	0.8757
2	298	0.9907	27	677	0.8757
3	332	0.9907	28	681	0.8638
4	341	0.9813	29	682	0.8520
5	348	0.9813	30	683	0.8520
6	371	0.9813	31	684	0.8520
7	376	0.9813	32	689	0.8520
8	395	0.9813	33	701	0.8520
9	407	0.9712	34	712	0.8390
10	437	0.9712	35	739	0.8259
11	438	0.9712	36	764	0.8259
12	473	0.9610	37	765	0.8125
13	476	0.9610	38	770	0.8125
14	477	0.9507	39	787	0.8125
15	487	0.9403	40	788	0.8125
16	501	0.9403	41	793	0.7980
17	526	0.9299	42	799	0.7980
18	532	0.9299	43	815	0.7833
19	535	0.9193	44	825	0.7686
20	537	0.9088	45	826	0.7540
21	561	0.9088	46	834	0.7393
22	589	0.8980	47	854	0.7245
23	590	0.8871	48	873	0.7096
24	592	0.8871	49	881	0.7096
25	624	0.8757	50	885	0.7096

جدول الف-۱- ادامه.

Table A1-Continued.

ردیف	زمان	قابلیت اطمینان	ردیف	زمان	قابلیت اطمینان
51	888	0.6937	76	1193	0.4150
52	895	0.6779	77	1223	0.4150
53	911	0.6779	78	1224	0.4150
54	915	0.6620	79	1225	0.3908
55	919	0.6620	80	1236	0.3664
56	936	0.6620	81	1244	0.3421
57	954	0.6620	82	1266	0.3421
58	970	0.6620	83	1280	0.3421
59	993	0.6446	84	1281	0.3158
60	997	0.6446	85	1293	0.2893
61	1019	0.6265	86	1308	0.2893
62	1020	0.6086	87	1321	0.2893
63	1023	0.5908	88	1342	0.2580
64	1032	0.5732	89	1345	0.2580
65	1043	0.5732	90	1354	0.2263
66	1051	0.5732	91	1356	0.1953
67	1052	0.5546	92	1376	0.1619
68	1075	0.5363	93	1393	0.1267
69	1087	0.5181	94	1411	0.0933
70	1094	0.4987	95	1424	0.0933
71	1133	0.4987	96	1445	0.0603
72	1161	0.4785	97	1485	0.0339
73	1163	0.4785	98	1499	0.0000
74	1179	0.4573			
75	1182	0.4361			

جدول الف-۲- تغییرات قابلیت اطمینان گروه دوم.

Table A2- Changes in reliability of the second group.

ردیف	زمان	قابلیت اطمینان	ردیف	زمان	قابلیت اطمینان
1	259	1.0000	26	722	0.9624
2	294	1.0000	27	726	0.9624
3	368	0.9942	28	756	0.9522
4	378	0.9942	29	790	0.9522
5	391	0.9942	30	832	0.9410
6	415	0.9942	31	851	0.9410
7	419	0.9942	32	863	0.9410
8	420	0.9942	33	874	0.9410
9	444	0.9942	34	896	0.9270
10	466	0.9942	35	914	0.9116
11	507	0.9878	36	918	0.9116
12	508	0.9878	37	947	0.9116
13	531	0.9878	38	952	0.8956
14	537	0.9878	39	954	0.8956
15	568	0.9878	40	959	0.8956
16	571	0.9878	41	973	0.8956
17	584	0.9878	42	974	0.8956
18	593	0.9878	43	975	0.8956
19	595	0.9878	44	977	0.8956
20	656	0.9878	45	995	0.8956
21	666	0.9878	46	1002	0.8956
22	688	0.9878	47	1006	0.8956
23	699	0.9807	48	1016	0.8956
24	707	0.9807	49	1018	0.8956
25	714	0.9723	50	1026	0.8956

جدول الف-۲- ادامه.

Table A2-Continued.

ردیف	زمان	قابلیت اطمینان	ردیف	زمان	قابلیت اطمینان
51	1036	0.8746	68	1283	0.6886
52	1037	0.8535	69	1315	0.6481
53	1046	0.8322	70	1326	0.6481
54	1048	0.8105	71	1332	0.6031
55	1053	0.7867	72	1341	0.6031
56	1063	0.7867	73	1343	0.6031
57	1109	0.7867	74	1352	0.5394
58	1143	0.7867	75	1354	0.4740
59	1159	0.7560	76	1355	0.4740
60	1164	0.7257	77	1366	0.4740
61	1169	0.7257	78	1367	0.4740
62	1175	0.7257	79	1374	0.4740
63	1181	0.7257	80	1392	0.4740
64	1218	0.7257	81	1406	0.4740
65	1246	0.7257	82	1409	0.4740
66	1256	0.6886	83	1417	0.4740
67	1278	0.6886			